PRINCIPIOS BASICOS

1.2 PRINCIPIOS AERODINAMICOS.

Aerodinámica es la parte de la mecánica de fluidos que estudia los gases en movimiento y las fuerzas o reacciones a las que están sometidos los cuerpos que se hallan en su seno. A la importancia propia de la aerodinámica hay que añadir el valor de su aportación a la aeronáutica. De acuerdo con el *número de Mach* o velocidad relativa de un móvil con respecto al aire, la aerodinámica se divide en *subsónica* y *supersónica* según que dicho número sea inferior o superior a la unidad.

Hay ciertas leyes de la aerodinámica, aplicables a cualquier objeto moviéndose a través del aire, que explican el vuelo de objetos más pesados que el aire. Para el estudio del vuelo, es lo mismo considerar que es el objeto el que se mueve a través del aire, como que este objeto esté inmóvil y es el aire el que se mueve (de esta ultima forma se prueban en los túneles de viento prototipos de aviones).

Es importante que el piloto obtenga el mejor conocimiento posible de estas leyes y principios para entender, analizar y predecir el rendimiento de un aeroplano en cualesquiera condiciones de operación. Los aquí dados son suficientes para este nivel elemental, no pretendiéndose una explicación ni exhaustiva ni detallada de las complejidades de la aerodinámica.

1.2.1 Teorema de Bernoulli.

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa", o dicho de otra forma "en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante", es decir que **p** + **v** = **k**.
Para que se mantenga esta constante **k**, si una partícula aumenta su velocidad **v** será a costa de disminuir su presión **p**, y a la inversa.

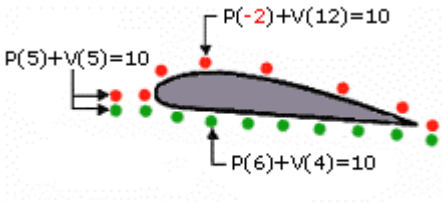


Fig.1.2.1 - Teorema de Bernoulli.

El teorema de Bernoulli se suele expresar en la forma $p+1/2dv^2 = constante$, denominándose al factor *p* presión estática y al factor $1/2dv^2$ presión dinámica.(1)

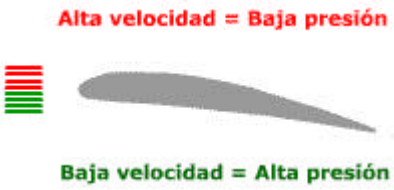
$$p + 1/2\ dv^2 = k; \qquad 1/2\ dv^2 = pd$$

p=presión en un punto dado. **d**=densidad del fluido. **v**=velocidad en dicho punto. **pd**=presión dinámica.

Enfocando este teorema desde otro punto de vista, se puede afirmar que en un fluido en movimiento la suma de la presión estática (**pe**) más la presión dinámica (**pd**), denominada presión total (**pt**) es constante: **pt**=**pe**+**pd**=**k**; de donde se infiere que si la velocidad de un fluido se incrementa, la presión estática disminuye.

Se puede considerar el teorema de Bernoulli como una derivación de la ley de conservación de la energía. El aire esta dotado de presión **p**, y este aire con una densidad **d** fluyendo a una velocidad **v** contiene energía cinética lo mismo que cualquier otro objeto en movimiento (**1/2 dv²**=energía cinética). Según la ley de la conservación de la energía, la suma de ambas es una constante: **p** + (**1/2dv²**) = **constante**. A la vista de esta ecuación, para una misma densidad (asumimos que las partículas de aire alrededor del avión tienen igual densidad) si aumenta la velocidad **v** disminuirá la presión **p** y viceversa.

En resumen, que si las partículas de aire aumentan su velocidad será a costa de disminuir su presión y a la inversa, o lo que es lo mismo: *para cualquier parcela de aire, alta velocidad implica baja presión y baja velocidad supone alta presión.*
Esto ocurre a velocidades inferiores a la del sonido pues a partir de esta ocurren otros fenómenos que afectan de forma importante a esta relación.



1.2.2 Efecto Venturi.

Otro científico, Giovanni Battista Venturi, comprobó experimentalmente que al pasar por un estrechamiento las partículas de un fluido aumentan su velocidad.

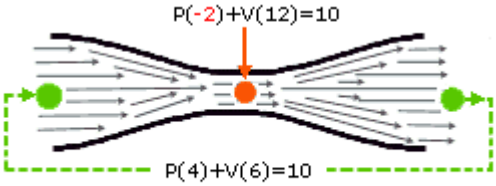


Fig.1.2.2 - Efecto Venturi.

1.2.3 3ª Ley del movimiento de Newton.

Para cada fuerza de acción hay una fuerza de reacción igual en intensidad pero de sentido contrario.

1.2.4 Porqué vuelan los aviones.

Un objeto plano, colocado un poco inclinado hacia arriba contra el viento, produce sustentación; por ejemplo una cometa. Un perfil aerodinámico, es un cuerpo que tiene un diseño determinado para aprovechar al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este perfil se sitúa en una corriente de aire. Un ala es un ejemplo de diseño avanzado de perfil aerodinámico.

Veamos que sucede cuando un aparato dotado de perfiles aerodinámicos (alas) se mueve en el aire (dotado de presión atmosférica y velocidad), a una cierta velocidad y con determinada colocación hacia arriba (ángulo de ataque), de acuerdo con las leyes explicadas.

El ala produce un flujo de aire en proporción a su ángulo de ataque (a mayor ángulo de ataque mayor es el estrechamiento en la parte superior del ala) y a la velocidad con que el ala se mueve respecto a la masa de aire que la rodea; de este flujo de aire, el que discurre por la parte superior del perfil tendrá una velocidad mayor (efecto Venturi) que el que discurre por la parte inferior. Esa mayor velocidad implica menor presión (teorema de Bernoulli).

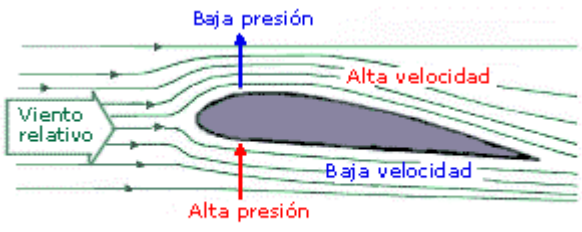


Fig.1.2.3 - Presión vs. Velocidad.

Tenemos pues que la superficie superior del ala soporta menos presión que la superficie inferior. Esta diferencia de presiones produce una fuerza aerodinámica que empuja al ala de la zona de mayor presión (abajo) a la zona de menor presión (arriba), conforme a la Tercera Ley del Movimiento de Newton.

Pero además, la corriente de aire que fluye a mayor velocidad por encima del ala, al confluir con la que fluye por debajo deflecta a esta última hacia abajo, produciéndose una fuerza de reacción adicional hacia arriba. La suma de estas dos fuerzas es lo que se conoce por fuerza de sustentación, que es la que mantiene al avión en el aire.

Como hemos visto, la producción de sustentación es un proceso continuo en el cual cada uno de los principios enumerados explican una parte distinta de este proceso. Esta producción de sustentación no es infinita, sino que como veremos en capítulos posteriores (1.7.3) tiene un límite.

1.2.5 Discutible.

A estas alturas y la vista de los ingenios mecánicos que vemos volar, cada vez más grandes y desarrollando mayores velocidades, se podría deducir que la mayoría de las cuestiones relativas a la aerodinámica son más que conocidas. Seguramente, a nivel de modelos y ecuaciones matemáticas así es, porque de otra forma no sería posible el espectacular desarrollo de la aeronáutica. Pero otra cuestión distinta es cuando se trata de ofrecer una visión desde el punto de vista de la física, al menos una visión facilmente comprensible para los que no poseemos los arcanos de esta ciencia.

Existen a este respecto al menos dos puntos de vista, a veces enfrentados entre sí y en ocasiones con virulencia, que reclaman para sí la explicación más coherente sobre el proceso de sustentación. Uno de ellos se apoya principalmente en el teorema de Bernoulli (baja presión encima del ala y alta presión debajo del ala) mientras que el otro se basa en las leyes de Newton (el flujo de aire deflectado hacia abajo "downwash" produce una reacción hacia arriba). Mi conocimiento de la física no llega a tanto, ni mucho menos, como para terciar en la polémica, pero lo que el sentido común me dicta, después de haber leido unos cuantos artículos al respecto, es que posiblemente se trate de puntos de vista distintos sobre un mismo proceso complejo.
Eso sí, estoy de acuerdo con los "newtonianos" en que la explicación "bernoulliana" de que el aire se acelera por encima del ala porque ha de recorrer mayor distancia (mismo tiempo de transición) y que por eso es necesario que la parte superior sea mas curvada que la inferior, no tiene ninguna base cientifica y es un absoluto error.

El tema es excitante pero excede el propósito de este "manual", no obstante, a los interesados en profundizar en el mismo les recomiendo visitar algunas de las páginas cuyos enlaces propongo en la sección de enlaces de interés.

Hay algunas teorías y explicaciones con respecto a la producción de sustentación que enfrentadas con los hechos y con pruebas realizadas resultan discutibles. Para evitar confusiones conviene contrastar algunos detalles.

Se mantiene a veces, que un ala produce sustentación debido a que la forma del perfil (curvado por arriba y plano por abajo) obliga al aire que pasa por encima del perfil a recorrer más distancia en el mismo tiempo que el que pasa por debajo, y eso solo puede hacerse, lógicamente, a mayor velocidad. Resulta atractivo ¿verdad?.

Esta teoría implica: primero, que es necesario que un perfil tenga diferencia de curvatura entre su parte superior e inferior, y segundo, que la parcela de aire dividida por el perfil recorre este por arriba y por abajo en el mismo tiempo para encontrarse en la parte posterior de dicho perfil. Sin embargo, en vuelo invertido la forma del perfil del ala es más curvada por abajo que por arriba y sigue produciendo sustentación, y hay aviones acrobáticos con alas de perfil simétrico (Pitts, Decathlon) que vuelan perfectamente, sin olvidar que otros perfiles simétricos (timones, estabilizadores, etc...) operan bajo los mismos principios aerodinámicos. Esto no parece concordar con la implicación primera ¿no?.

Por otro lado, las pruebas realizadas en túneles de viento muestran que la capa de aire que recorre la parte superior (a pesar de la mayor distancia) lo hace en un tiempo sensiblemente menor que la capa que recorre la parte inferior, además de que ambas no vuelven a coincidir en la parte posterior del perfil. ¿Adónde nos lleva esto?. A afirmarnos en que los principios reseñados de porqué vuela un avión son válidos, con independencia de la simetría o asimetría del perfil y de la diferencia de curvatura entre las superficies superior e inferior.

Por ejemplo, el ala usada por los hermanos Wright en su primer aeroplano era delgada, muy curvada y algo cóncava por la parte inferior. No tenía diferencia significativa de curvatura entre la parte superior e inferior y sin embargo producía sustentación debido a los mismos principios que las alas de hoy en día.

Fig.1.2.4 - El Flyer de los Wright.

Si la sustentación dependiera únicamente de la forma del ala, puesto que esta forma no cambia con el vuelo, no habría forma de variar la sustentación; el aeroplano solo soportaría su peso a una velocidad determinada y además sería inestable e incontrolable. Veremos más adelante como el piloto regula la sustentación mediante el control del ángulo de ataque y la velocidad.

Para terminar, decir que los diseños de alas curvadas y con diferencia de curvatura entre la parte superior e inferior responden a razones eminentemente prácticas, pues estos perfiles mejoran la sustentación y tienen mejores características ante la pérdida (Ver 1.3.2)

Sumario:

- Según Bernoulli, alta velocidad implica baja presión y viceversa.
- Venturi demostró que un fluido al pasar por un estrechamiento es acelerado.
- A una fuerza de acción se le opone otra de reacción de igual intensidad pero de sentido contrario, dice la 3ª Ley del Movimiento de Newton.
- Un ala es muy efectiva cambiando la velocidad del aire: el que fluye por encima es acelerado mientras que el que fluye por debajo es retardado; incluso aunque el que pase por arriba tenga un camino más largo, alcanzará el borde de salida antes que el que pasa por abajo.
- La disminución de presión por encima del ala es mucho más pronunciada que el aumento de presión por debajo de la misma.
- Cada parcela de aire sufre un cambio temporal en su velocidad al ser incidida por el ala; al alcanzar el borde de salida tenderá a recuperar la velocidad del aire libre.
- Un ala moviéndose a través del aire produce un flujo circulatorio proporcional al ángulo de ataque y la velocidad con que incide sobre este aire. Este flujo circulatorio es más rápido por la parte superior que por la inferior del ala. La diferente velocidad produce diferente presión y esta presión diferencial produce sustentación.
- La deflexión hacia abajo del flujo de aire en el borde de salida del ala, produce una fuerza de reacción hacia arriba que también genera sustentación.
- Es deseable, pero no imprescindible, que la parte superior del ala sea más curvada que la parte inferior.

© M.A.Muñoz Sep/2000

---

(1). Más exactamente el teorema de Bernoulli dice: "Cuando en un fluido ideal se produce una corriente estacionaria, a lo largo de la línea de corriente se produce la ecuación **p + dgh + 1/2dv² = constante**, siendo: **p** la presión en el punto considerado, **d** la densidad del fluido, **g** la aceleración de la gravedad, **h** la altura respecto a un nivel de referencia común a todos los puntos del fluido y **v** la velocidad del mismo".